



УДК 621.313.3

**ОБЗОР МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО  
ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ  
ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С  
ЭЛЕКТРОМАГИТНЫМ ВРАЩАТЕЛЕМ****REVIEW OF MULTIFUNCTIONAL MELTING  
AGGRAGATE ON BASIS OF INDUCTION  
CRUCIBLE FURNACE WITH ELECTROMAGNETIC  
ROTATOR**

**Масюк Георгий Эдуардович**, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: [masyuk-george@yandex.ru](mailto:masyuk-george@yandex.ru). Тел.: +7(963)444-33-55

**Сарапулов Фёдор Никитич**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: [sarapulovfn@yandex.ru](mailto:sarapulovfn@yandex.ru). Тел.: +7(343)375-41-87

**Masyuk George Eduardovich**, master student, Department «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: [masyuk-george@yandex.ru](mailto:masyuk-george@yandex.ru). Ph.: +7(963)444-33-55

**Sarapulov Fedor Nikitich**, doctor Sc., Prof., Department «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: [sarapulovfn@yandex.ru](mailto:sarapulovfn@yandex.ru). Ph.: +7(343)375-41-87

**Аннотация:** В данном докладе рассмотрен вопрос жидкофазного восстановления металла. Для данной операции рассмотрен многофункциональный плавильный агрегат. Произведен обзор режимов его работы и актуальность применения на металлургических предприятиях. Рассмотрены два основных типа конструктивного исполнения с боковым или торцевым электромагнитным вращателем. Представлены результаты расчета и моделирования устройства.

**Abstract:** In this paper, the liquid-phase reduction of metal is considered. A multifunctional melting aggregate is considered for this operation. The review of its operating modes and the relevance of the application at the metallurgical enterprises have been made. Two basic types of design are considered: with side and bottom electromagnetic rotators. The results of calculation and simulation of the device are presented.

**Ключевые слова:** многофункциональный плавильный агрегат; электромагнитный вращатель; индукционная тигельная печь.

**Key words:** multifunctional melting aggregate; electromagnetic rotator; induction crucible furnace.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в металлургии для плавки металлов, переработки отходов и шлаков используют неэффективные способы, например, по схеме домна-конвертер. Такая схема обладает существенными недостатками и может считаться устаревшей, по крайней мере, по двум причинам: высокий расход энергоресурсов и загрязнение окружающей среды [1].

**АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АГРЕГАТА**

Спрос на энергосберегающие технологии во всем мире только растет во всех отраслях. Ввиду повышающихся требований к качеству изделий все больше компаний проявляют интерес к высокотехнологичному оборудованию. Альтернативным устройством доменной печи выступает, например, индукционная тигельная печь (ИТП).

Как известно [1], перспективность процессов жидкофазного восстановления вытекает из возможности снижения ресурсоемкости (себестоимости) конечного продукта за счет использования прежде всего дешевого топлива и

восстановителя, что имеет решающее значение. Оценка эффективности процессов высокотемпературного жидкофазного восстановления свидетельствует о том, что перевод черной металлургии на эту новую производственно-технологическую схему получения металлопродукции может обеспечить снижение себестоимости стали в 1,5...2 раза, уменьшение безвозвратных потерь железа в 2...3 раза, сокращение энергоемкости металлопродукции более чем в 2 раза и, наконец, увеличение производительности, коренное улучшение условий труда и защиты окружающей среды.

Важный аспект жидкофазного восстановления заключается в том, что в ходе химических реакций в верхней части (зеркале) тигля образуется шлак, агрессивно воздействующий на стенки футеровки. Чтобы минимизировать контакт шлака с футеровкой необходимо создать лунку (воронку) в тигле, увеличив при этом контакт металла с футеровкой. Для данной операции предлагается использовать дополнительную магнитогидродинамическую (МГД) машину, придающую требуемую скорость вращения расплаву. В то же время это влечет за собой ускорение проведения химических и массообменных реакций, а также получение более качественного отлива. МГД машина представляет собой индуктор, создающий вращающее магнитное поле вокруг оси тигля. Такую комбинацию тигельной печи с МГД вращателем принято называть **многофункциональным плавильным агрегатом (МПА)**. По принципу действия МПА схож с трансформатором, где вторичный элемент представлен загрузкой печи. Значительные токи, индуцированные в загрузке, расплавляют её. МГД машина, в свою очередь, приводит во вращение металл. Стоит отметить, что данная технология является экологически чистой, так как при работе не происходит выброса вредных смесей и газов.

#### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ АГРЕГАТА

При разработке МПА выделены два основных направления по проектированию МГД вращателей. Так, при переработке шихты в условиях мелкого производства с загрузкой печи до одной тонны преимущественно рекомендуется выполнять вращатель в виде **боковой** МГД машины (БЭМВ), а в условиях крупного комбината с загрузкой выше одной тонны **торцевой** электромагнитный вращатель (ТЭМВ). Также имеет место комбинированный способ управления расплавом.

Исходя из общей конструкции МПА, можно выделить следующие режимы работы, используя диаграмму мощностей МПА [2]: 1. Режим подготовки подложки (рис. 1):  $P_{2\text{пол}} < R_{\text{инд.ИТП}} +$

$+ R_{\text{инд.БЭМВ}} + R_{\text{инд.ТЭМВ}} + R_{\text{т.плазм.}}$ .

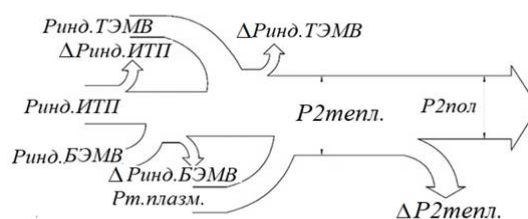


Рис. 1. Энергетическая диаграмма режима подготовки подложки

2. Режим восстановительных реакций – технологический (рис. 2):  $P_{2\text{пол}} > R_{\text{инд.ИТП}} + R_{\text{инд.БЭМВ}} + R_{\text{инд.ТЭМВ}} + R_{\text{т.плазм.}}$ .

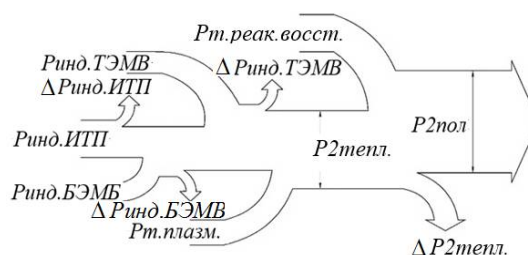


Рис. 2. Энергетическая диаграмма технологического режима

Рассмотрим МПА с боковым ЭМВ. Общий вид такого МПА представлен на рисунке 3.

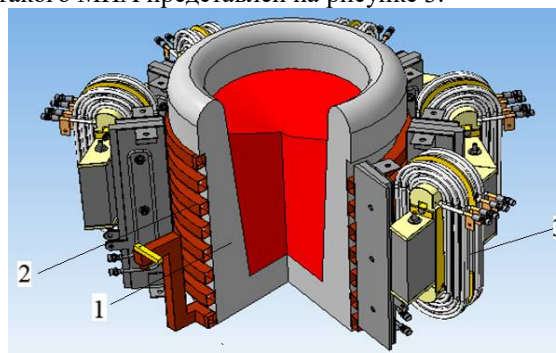


Рис. 3. Конструкция МПА с боковым ЭМВ

Основными элементами агрегата являются тигель печи (1), греющий индуктор (2) и боковой ЭМВ (3). Свойства МПА с боковым вращателем были рассмотрены в работе [3]. Агрегат разработан на базе ИТП для плавки стали емкостью 0,4 т, получающей питание от преобразователя частоты мощностью 500 кВт и выходной частотой 1 кГц, основная функция которой – плавка стального лома. Питание индуктора вращателя осуществляется от источника промышленной частоты ввиду минимизации затрат. Магнитопровод вращателя выполнен разомкнутым. Это обусловлено необходимостью размещения токо- и водопроводов к обмотке основного (греющего) индуктора. Общий вид бокового вращателя показан на рисунке 4.

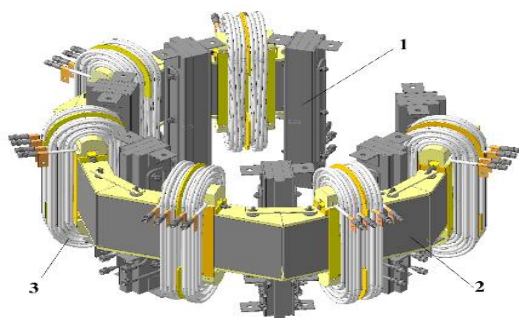


Рис. 4. Боковой электромагнитный вращатель

Основными элементами являются катушка (3) и ярмо (2), на которое она насаживается. Крепится такой вращатель к обратным магнитопроводам (1) болтовыми соединениями. Для моделирования электромагнитных и тепловых процессов в МПА были использованы программное обеспечение COMSOL Multiphysics, а также пакет MathCAD. Ниже представлены расчетные значения скоростей (рис. 5), x- и y- составляющая силы Лоренца (рис. 6-7).

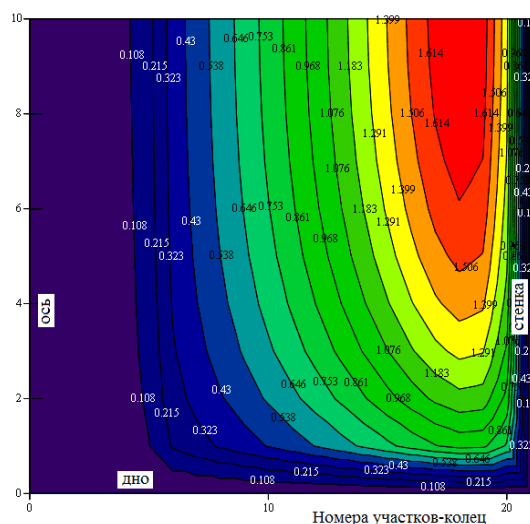


Рис.5. Линии равных скоростей расплава в сечении тигля

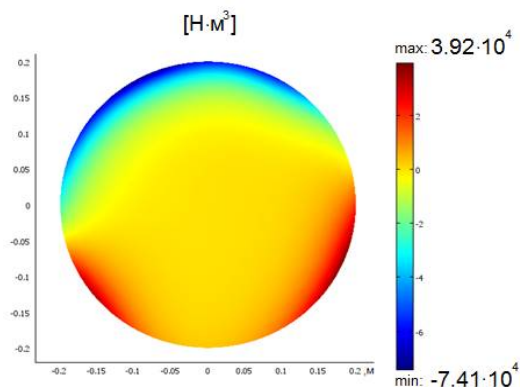


Рис. 6. Распределение Y-составляющей силы Лоренца в расплаве металла

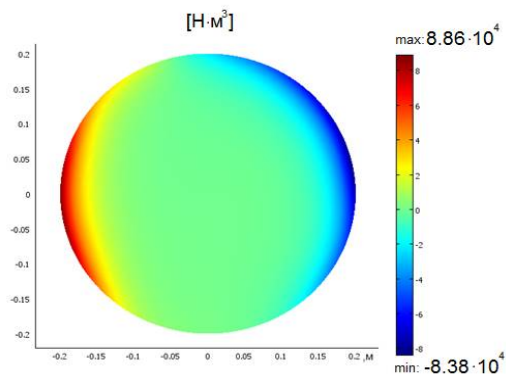


Рис. 7. Распределение X-составляющей силы Лоренца в расплаве металла

Во втором случае конструирования МПА для вращения расплава предлагается использовать торцевой ЭМВ с кольцевой обмоткой. Общий вид такого МПА представлен на рисунке 8. Основными элементами агрегата являются тигель печи (1), греющий индуктор (2) и торцевой ЭМВ (3), находящийся под днищем печи.

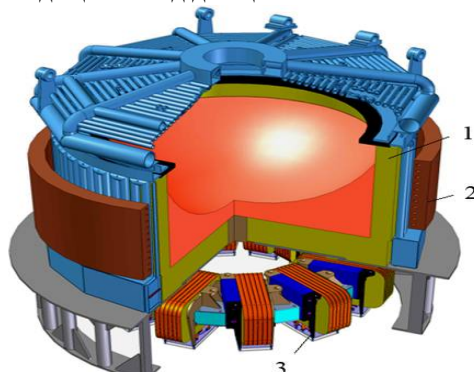


Рис. 8. Конструкция МПА с торцевым ЭМВ

Отношение высоты к диаметру тигля – меньше единицы. Это вызвано иным его назначением – перерабатывать шихту, содержащую оксиды металлов. Обычные же тигельные индукционные электропечи, и многие дуговые электропечи как переменного, так и постоянного тока перерабатывают в основном металлический лом [4]. На рисунке 9 представлена более подробно конструкция торцевого ЭМВ.

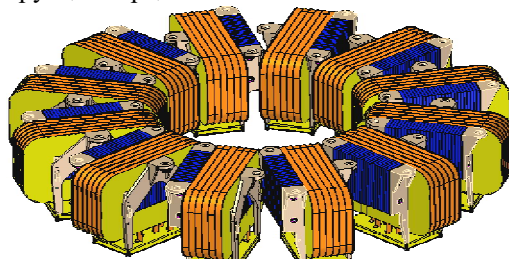


Рис. 9. Конструкция торцевого ЭМВ

В работе [5] был исследован торцевой ЭМВ для тигля радиусом 1 м, загруженный сталью. Рассчитанное при помощи программного обеспечения Mathcad распределение усилий, вращающих кольца металла, показано на рисунке 10.

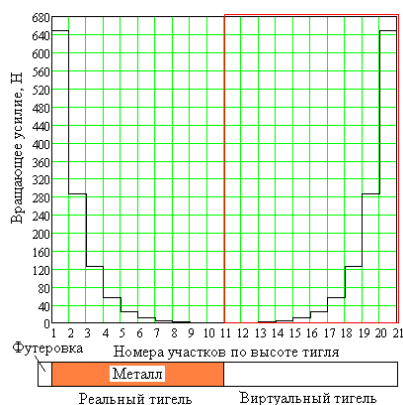


Рис. 10. Вращающие усилия колец металла

На рисунке 11 приведены конфигурация лунки, а также форма свободной поверхности и цветовая гамма скоростей расплава, полученные с помощью пакета COMSOL Multiphysics.

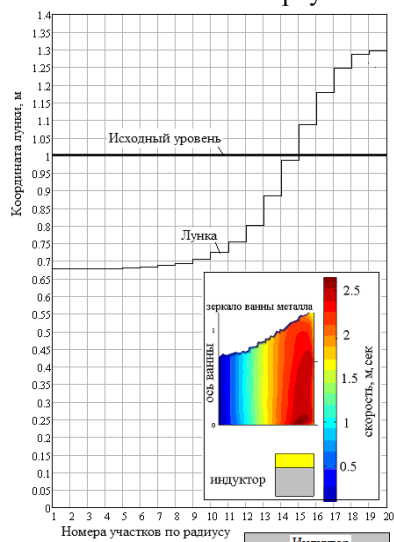


Рис. 11. Конфигурация лунки

На рисунке 12 показаны скорости расплава. Как видно, усилия интенсивно затухают по высоте металла. По радиусу вращающие усилия сосредоточены в узкой полосе расплава шириной 0.4 м над индуктором.

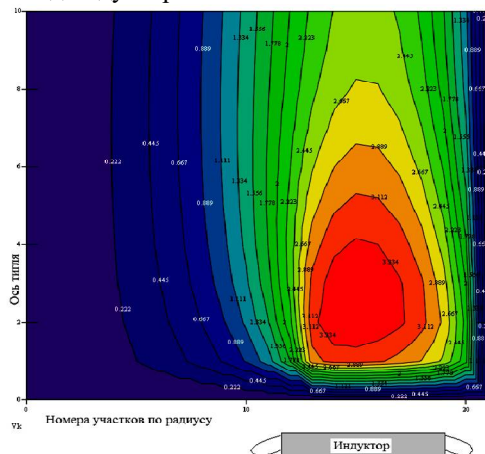


Рис. 12. Линии равного уровня скорости в продольном сечении тигля

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взамен устаревшим технологиям рассмотрен многофункциональный плавильный агрегат. В результате технологический процесс сопровождается минимальными ресурсозатратами. В работе приведены результаты моделирования плавильного агрегата разной конструкции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С. П. Буркин. Ресурсо- и энерго-сбережение в металлургии. Разработка машин и технологий металлургии при инновационном риске / С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, В.В. Шимов, Н.А. Бабайлов, Е.А. Андрюкова. Екатеринбург. УрФУ. 2010. С. 70.
2. Фаткуллин С. М. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, формирование энергоэффективных режимов работы многофункционального индукционного плавильного агрегата на основе индукционной тигельной печи. Екатеринбург. 2011. С. 13.
3. И. А. Усков. Магистерская диссертация, разработка и исследование опытного образца многофункционального плавильного агрегата. Екатеринбург. УрФУ. 2015. С 16-26.
4. Е. А. Коршунов. Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях миниметаллургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов. Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях миниметаллургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов, Д. Н. Гайнанов, В. Л. Бастриков, В. В. Фадеев, В. И. Лузгин, А. Ю. Петров, Ф. Н. Сарапулов, В. Г. Лисиенко, В. С. Третьяков. ДАТА-ЦЕНТР. Екатеринбург. 2004. С 3.
5. Ф. Н. Сарапулов. Исследование гидромеханических процессов в жидкометаллическом роторе индукционного вращателя, Индукционный нагрев №22. Ф. Н. Сарапулов, С. Ф. Сарапулов, В. Э. Фризен, Ф. Е. Тарасов. 2012. С. 21-24.